

半圓頂型屋蓋結構物表面擾動風壓之交頻譜特性探討

蕭宇廷¹ 羅元隆²

¹ 淡江大學土木工程系碩士生

² 淡江大學土木工程系助理教授

摘要

大跨徑屋蓋結構為現今社會常見的結構型態之一，具有大空間且多功能的特性。依我國建築物耐風設計規範，此類結構物高寬比偏小可歸類為低矮建物。然而由於跨度大且材質輕的特性，屋蓋表面受風壓分布影響甚鉅，一般不建議以簡易計算方式給定設計風載重，而另行於規範中表列外風壓係數值進行設計。過去大跨徑屋蓋結構相關文獻中，對於表面風壓特性的討論不勝少數，但大部分為定性探討。本文進行以不同屋蓋曲率及不同雷諾數為兩項控制參數，探討交相關頻譜特性的表面分布特性，並藉由半經驗公式針對兩鄰近擾動風壓之 Root-coherence 函數進行擬合。以擬合之結果討論其沿著表面上下游的趨勢變化，作為未來計算風力載重之依據。由結果得知，依據屋蓋曲率 f/D 的不同，可以明顯地觀察到交相關頻譜的變化甚鉅；當相鄰兩風壓的間隔增大時則更能凸顯變化。而底座側牆的變化 h/D 則對交相關頻譜幾乎沒有影響。另外，從不同雷諾數的結果來看，其變化不如屋蓋曲率 f/D 來得明顯。由本文的擬合結果中，某些位置的擬合尚不夠準確，例如分離點發生位置前後，流場特性改變劇烈導致一般經驗公式尚不足以模擬之。

關鍵字：半圓頂型屋蓋，交相關頻譜，屋蓋曲率，雷諾數

Keywords: Domed Roofs, Cross Spectrum, Roof Curvature, Reynolds Number

1. 前言

隨著時代的發展與經濟的起飛，在全世界人口逐漸上升的趨勢下，人口過於的擁擠再加上所能利用的土地空間越來越少。為了舒緩這些問題，再加上建築技術的進步，開始出現高樓大廈林立於城市中。然而近年來，體育表演與娛樂活動的興起、大量儲存空間的需求出現，能夠解決此問題的大型結構就是大跨度建築，擁有能以最小表面積卻能產生出最大封閉室內空間。台灣地區位處於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處、西太平洋熱帶氣旋地區，地震與颱風非常的頻繁。大跨徑結構跨度的增加與其本身整體質量輕量化的影響，造成此結構對風產生的影響非常的敏感，風力載重可以說是設計過程中重要的一環。為了得到較準確的設計風載重，必須進行風洞試驗模擬外型對風力的影響。一

般風洞試驗雷諾數的範圍大多在 10^5 範圍內，對於一般矩形斷面建築，實驗結果不受雷諾數的變化影響；但對於曲面外型建築，風力特性則與雷諾數極為相關。兩者差異之處在於分離點發生的位置不同，當風流經矩形斷面時，其氣流分離現象發生的位置會在結構不連續面角隅銳緣處；而對於曲面型建築而言，其分離的位置則與雷諾數有關。因此在本研究中將以不同屋蓋曲率與不同雷諾數的半圓頂型大跨度建築為研究對象，經由一系列的風洞試驗探討基本氣動力特性，再藉由半經驗公式進行交相關頻譜係數之擬合，做為日後風力載重計算之依據。

2. 風洞實驗設置與曲面屋蓋分區概念

本研究使用 Lo and Kanda [1]於日本東京大學之實驗結果與 Cheng and Fu [2]於內政部建築研究所之實驗結果進行交相關頻譜函數之擬合，主要探討不同雷諾數與不同高跨比模型的比較與影響。

2.1 風洞實驗設置

實驗主要分為不同雷諾數與不同外型效應進行，不同雷諾數效應為 Cheng and Fu [2]於內政部建築研究所進行紊流場之大範圍雷諾數實驗，實驗館的風洞為垂直向封閉循環式風洞，所能提供的流場最大風速分別為 30 m/s 與 20 m/s，該風洞斷面為寬 4.0 m 以及高 2.6 m，實驗量測區距離入口端約為 25 m。

紊流邊界層流場的模擬如圖一所示，利用錐形擾流版及矩型方塊所組成之粗糙元素，模擬出紊流邊界層流場，流場特性符合指數律中 $\alpha = 0.27$ 之流場，在模型高度紊流分佈約為 18% ~ 25%，雷諾數範圍為 $5.3 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^6$ ，而在本研究中列出的雷諾數範圍則為 6.7×10^4 、 4.3×10^5 、 1.0×10^6 、 1.8×10^6 。



圖 1 紊流邊界層流場於內政部建研所



圖 2 紊流邊界層流場於日本東京大學

不同外型效應為 Lo and Kanda [1]於日本東京大學之實驗結果，工作段為 1.8 m × 1.8 m，發展長度到工作段距離為 12.5 m，邊界層高度為 1.20 m，所能提供的流場風速範圍為最低 0.5 m/s 與 13.0 m/s。實驗主要進行紊流邊界層流場，如圖 2 所示，與各種不同高跨比模型之試驗。利用錐形擾流版及矩型方塊所組成之粗糙元素，模擬出紊流邊界層流

場，符合日本 AIJ 規範中的指數律中 $\alpha = 0.27$ 之流場，平均風速為 11.1m/s。在模型高度紊流分佈約為 15% ~ 20%，其雷諾數範圍為 $1.1 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^5$ 。

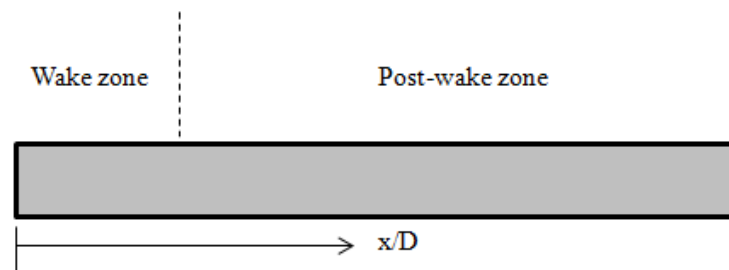
Cheng and Fu [2]之試驗模型採用壓克力半圓球模型，模型底部直徑分別為 120 cm、50 cm 及 20 cm。量測壓力位置沿著半球表面中心子午線平均分佈。本研究中將每個量測壓力孔水平位置定義為 x ，模型跨度定義為 D ，以模型中心為原點，風壓孔分布於 $x/D = -0.5 \sim 0.5$ 之間；此外，風壓孔位置的表現方式亦可以 θ 由上游至下游為 0 至 180° 表示之。Lo and Kanda [1]之試驗模型同樣採用壓克力半圓球模型，但為了能產生各種不同的幾何尺寸，使用屋頂模型與圓柱面模型進行組合，模型底部直徑分別為 30 cm。將屋頂模型的高度定義為 f 、圓柱面模型的高為 h ，表 1 列出所有屋頂模型與圓柱面模型。除了 $f/D = 0.0$ 與 $h/D = 0.0$ 外，總共有 35 種測試模型。

表 1 幾何尺寸與測試模型術語

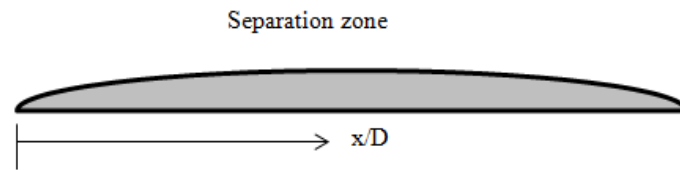
D = 30cm		f/D (屋頂高與跨度比值)					
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
(圓柱面高與跨 度比值)	0.0	None	B0	C0	D0	E0	F0
	0.1	A1	B1	C1	D1	E1	F1
	0.2	A2	B2	C2	D2	E2	F2
	0.3	A3	B3	C3	D3	E3	F3
	0.4	A4	B4	C4	D4	E4	F4
	0.5	A5	B5	C5	D5	E5	F5

2.2 分區概念

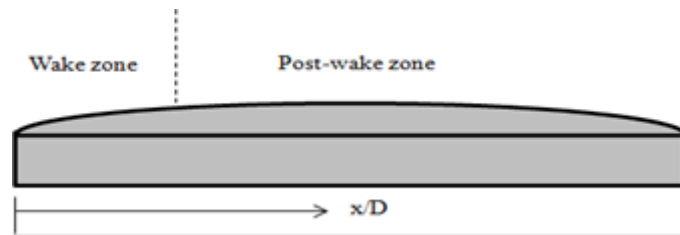
Lo and Hsiao [3]從平均風壓係數、擾動風壓係數與交相關係數分布中觀察，依據不同流場現象將每個模型做分區，每一個區域都代表著不同的意義，如圖 3 所示。將 $f/D = 0.0$ 歸類為平坦模型，分為尾跡區與過尾跡區。 $f/D = 0.1$ 模型可分為兩種討論，當 $h/D = 0.0 \sim 0.1$ 時，歸類為近半球模型，僅有分離區；當 $h/D = 0.2 \sim 0.5$ 時，歸類為平坦半球模型，與平坦模型相同可分成尾跡區與過尾跡區兩區。最後將 $f/D = 0.2 \sim 0.5$ 歸類為半球模型，分成迎風區、分離區、尾跡區三區，在不同雷諾數效應下所使用的模型也將歸類為半球模型討論。



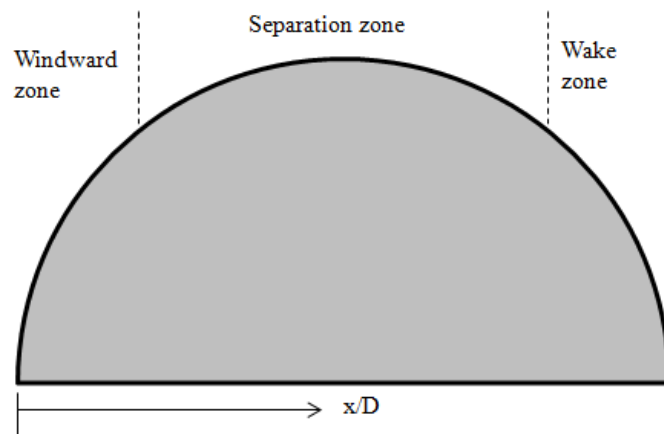
(a) 平坦模型



(b) 近半球模型



(c) 平坦半球模型



(d) 半球模型

圖 3 各模型分區概念

3. 風洞實驗結果與探討

3.1 交相關頻譜函數特性

為了能針對 Co-coherence 得到更明確的數值，將 Co-coherence 公式分解成 Root-coherence 和 phase function 兩項，定義為：

$$C_{ij}(\Delta s, f) = R_{ij}(\Delta s, f) \cdot \exp(i \cdot \theta_{ij}(\Delta s, f)) \quad (1)$$

其中 Δs 代表著兩壓力孔之間的距離， $R_{ij}(f)$ 代表著 Root-coherence， $\theta_{ij}(f)$ 代表著 phase function。本研究針對 Root-coherence 進行探討。圖 4 所示為模型 F0 ($f/D = 0.5$ 、 $h/D = 0.0$) 相對應 Root-coherence。可以清楚地觀察到， 6° - 12° 、 30° - 36° 為迎風區，有逐漸衰減的趨

勢，當到達 48° - 54° 、 90° - 96° 時為分離區，整體趨勢逐漸變得平緩；最後在 120° - 126° 、 144° - 150° 時尾跡區部分開始逐漸上升，會造成此現象可以被認為是由於再接觸現象的發生，其在後方產生的渦炫導致能量的變化。

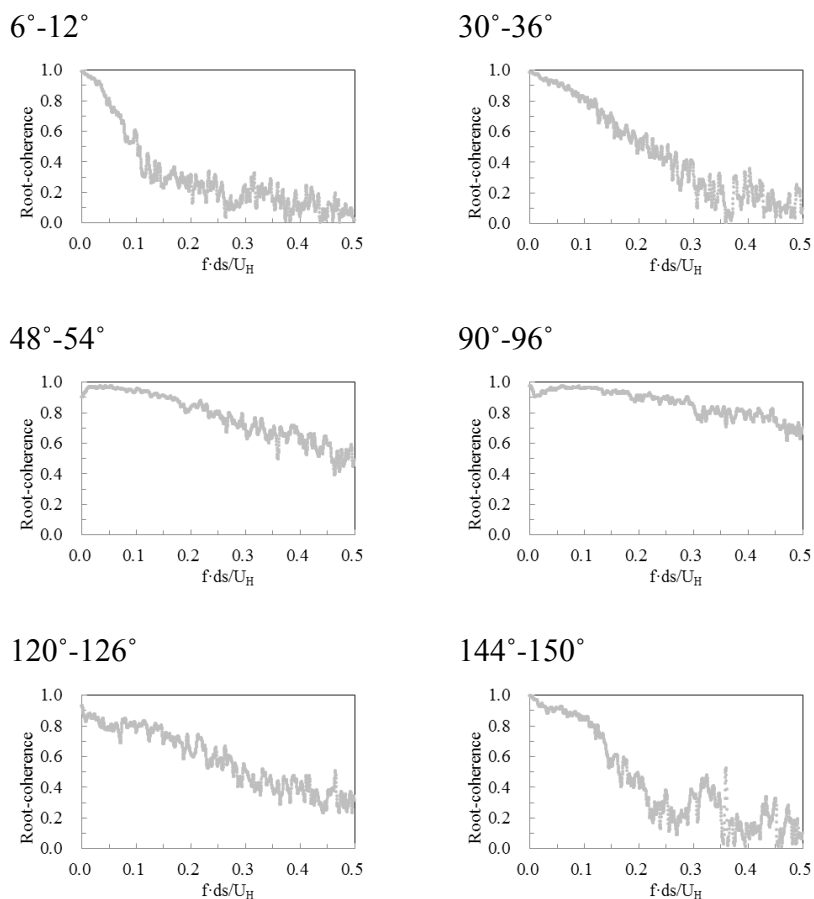


圖 4 模型 F0 ($f/D = 0.5$ 、 $h/D = 0.0$)相對應之 Root-coherence

3.2 半經驗擬合公式之應用與趨勢變化

過去大跨度相關文獻對於風壓相關特性的討論不勝少數，但均為定性探討。因為風壓相關性是包含許多結構特性與氣動力因素在內，難有一普遍化的均一公式。本研究採用 Hui et al. [4]提出的半經驗公式進行 Root-coherence 擬合，定義如下：

$$R_{ij}(\Delta s, f) = K \cdot \exp\left(-C \frac{f\Delta s}{U_H}\right) \quad (2)$$

係數 C 代表整體的衰減係數，係數 K 代表在頻率為零時的起始係數。本研究以此公式進行 Root-coherence 公式係數 C 與 K 的擬合之討論。在本研究中，依上節所提之壓力孔以頻道(Ch)表示並進行兩相鄰壓力孔之擬合。若為第一個壓力孔與第二個壓力孔、第二個壓力孔與第三個壓力孔進行擬合，則以間距為一表示。同時也進行間距為二的擬合。

如圖 5 所示為模型 F5($f/D = 0.5$ 、 $h/D = 0.5$)的第一個壓力孔(Ch1)與第二個壓力孔(Ch2)之擬合結果。灰色虛線為實驗值，黑色實線為擬合結果曲線，可得到係數 $C = 6.618$ 與係數 $K = 1.000$ 的擬合結果。

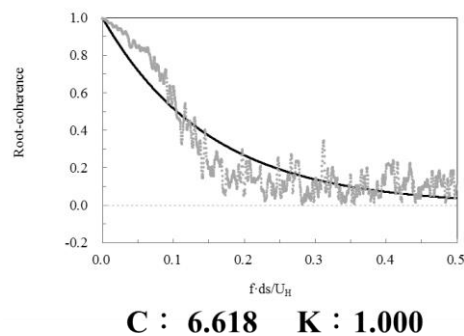


圖 5 模型 F5($f/D = 0.5$ 、 $h/D = 0.5$) Ch1 與 Ch2 係數擬合結果

圖 6 ~ 圖 11 顯示為係數擬合之結果。首先從雷諾數變化觀察，圖 6 中係數變化與半球模型類似。係數 C 能夠明顯分成三區，在分離區與尾跡區各有一個轉折點，隨著雷諾數增加，其值會逐漸上升；係數 K 也能夠很清楚地以正中間為對稱軸左右兩邊呈現出較低的值，以上現象皆會因兩點之間的間距變大而更加明顯。

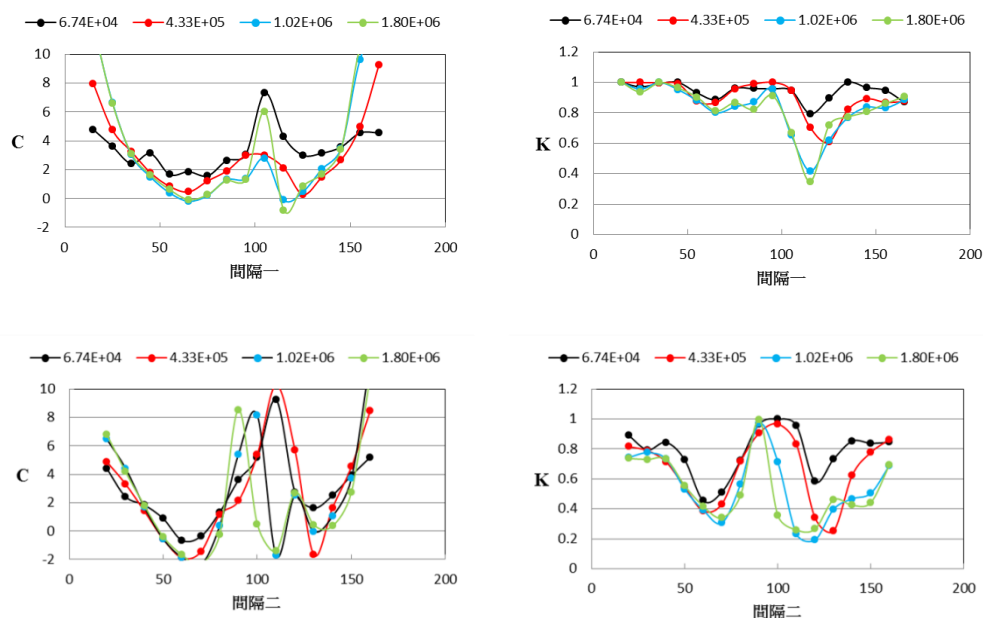
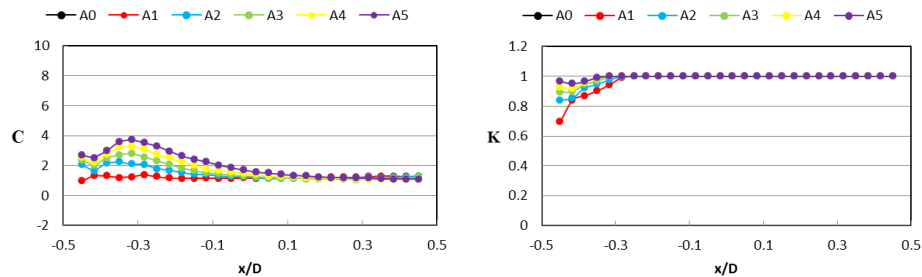


圖 6 不同雷諾數效應係數擬合結果

從外型效應部分，如圖 7 ~ 圖 11，可看到平坦模型部分隨著 h/D 的增加，在前端部分的值會隨著高度增加而逐漸變大；圖 8 的近半球模型則成一條曲線分佈，因其模型貼近地表。圖 9 中平坦半球模型的分佈也與平坦模型相同，在前端部分有著較低的值。圖

10 ~ 圖 11 皆為半球模型。當 $f/D = 0.2$ 時其變化並不是很明顯，只能觀察到尾跡區部分有一個明顯轉折點； $f/D = 0.5$ 時，係數 C 的部分尾跡區出現一很明顯的峰值，係數 K 也呈現出很明顯左右對稱。

間隔一



間隔二

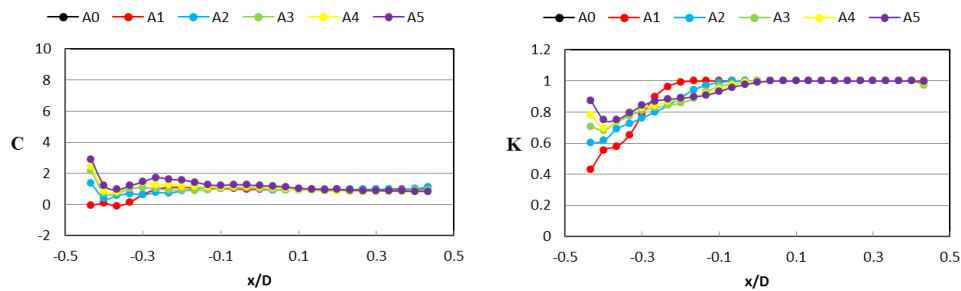
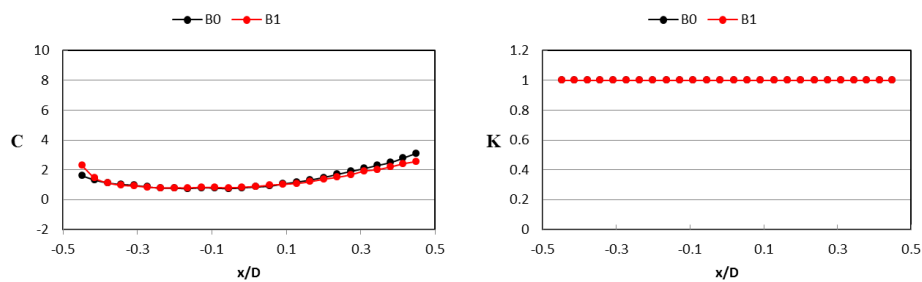


圖 7 模型 $f/D = 0.0$ ($h/D = 0.0 \sim 0.5$) 係數擬合結果

間隔一



間隔二

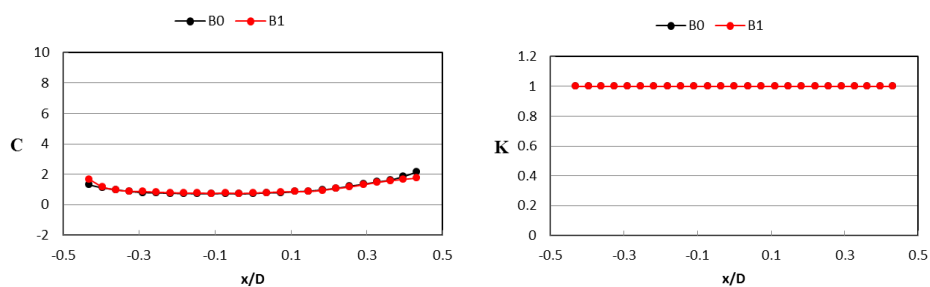


圖 8 模型 $f/D = 0.1$ ($h/D = 0.0 \sim 0.1$) 係數擬合結果

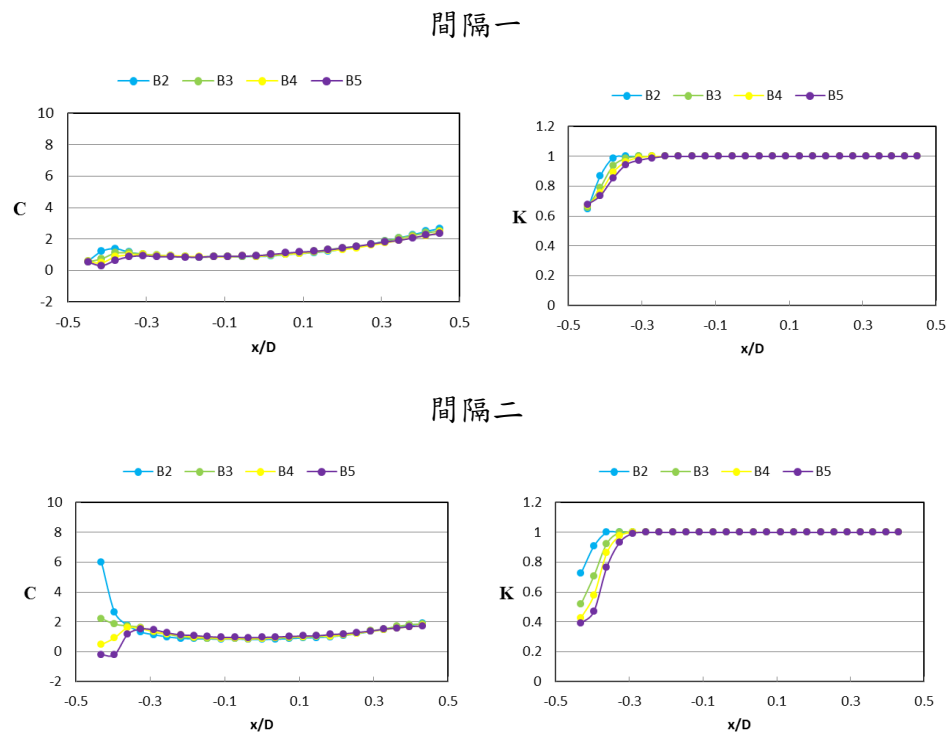


圖 9 模型 $f/D = 0.1$ ($h/D = 0.2 \sim 0.5$) 係數擬合結果

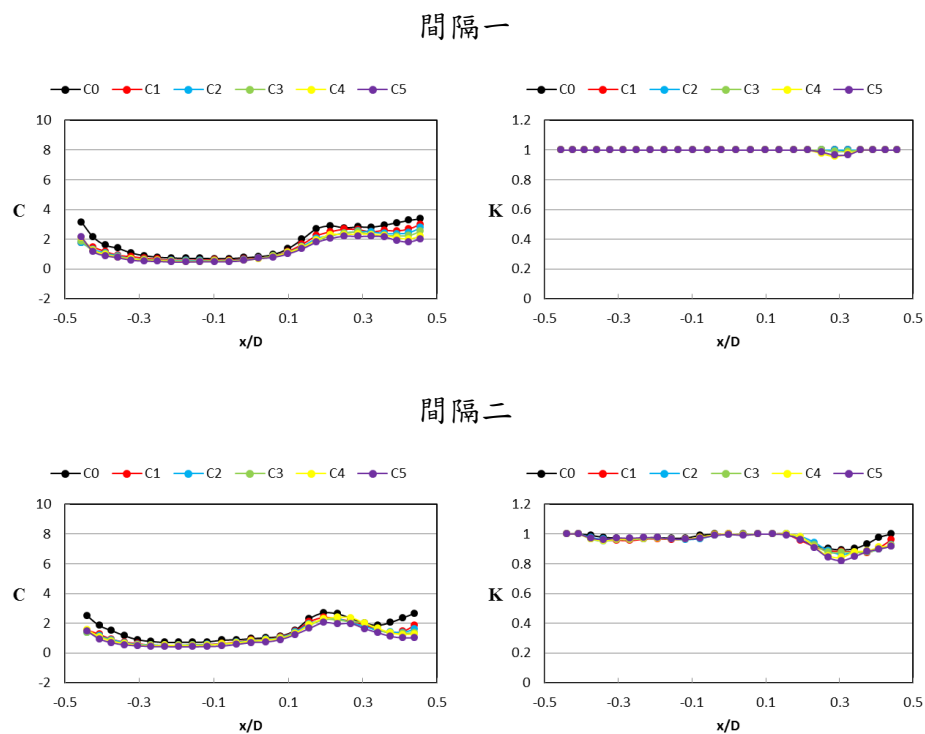
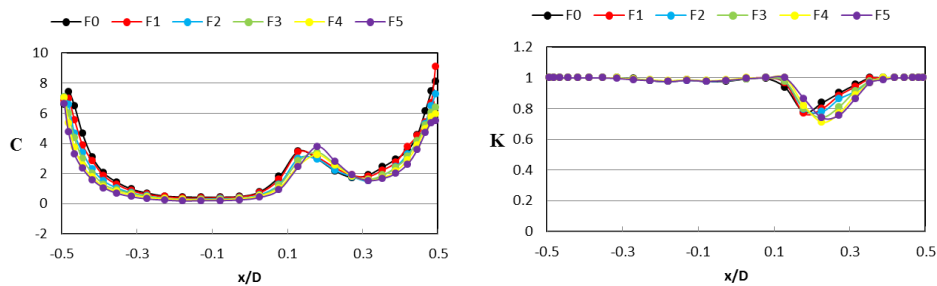
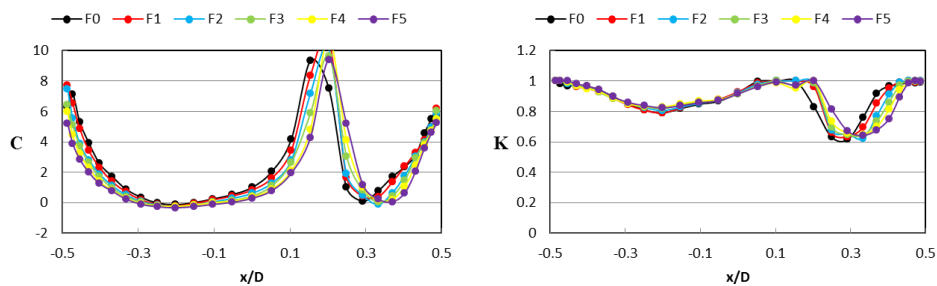


圖 10 模型 $f/D = 0.2$ ($h/D = 0.0 \sim 0.5$) 係數擬合結果

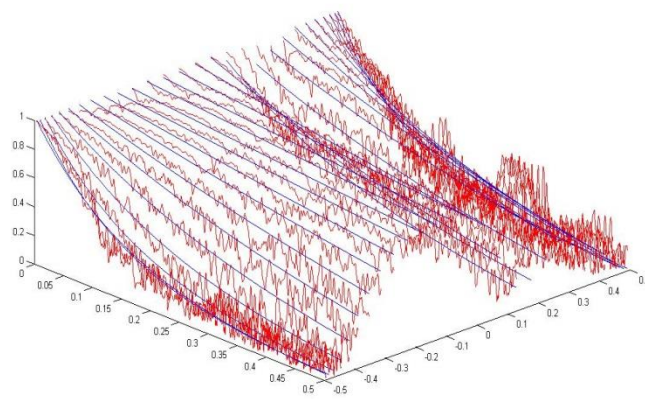
間隔一



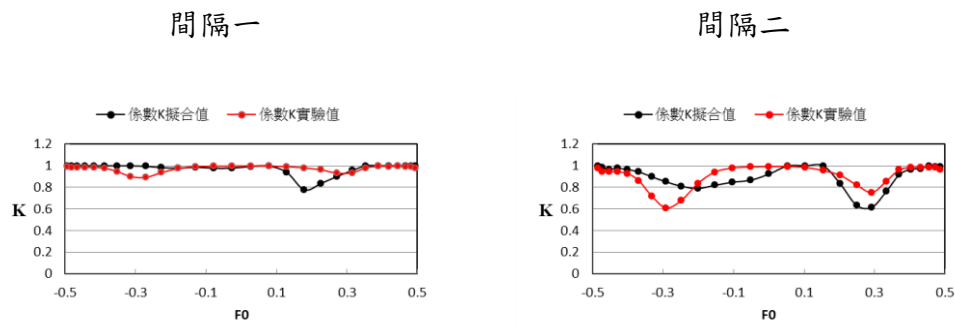
間隔二

圖 11 模型 $f/D = 0.5$ ($h/D = 0.0 \sim 0.5$) 係數擬合結果

為了探討係數 C 與 K 分布特性，以半球模型 $F5$ ($f/D = 0.5$ 、 $h/D = 0.0$) 觀察，如圖 12 係數 C 代表整體的衰減係數，將所有實驗值與擬合值曲線以立體 3D 圖一起觀察，則在接近分離區與尾跡區的位置時，在高頻部分明顯出現兩個尖峰值，而當接近尾跡區時，在低頻部分則出現較低的值，整題來說在分離區與尾跡區部分尼和的結果並不是很好。

圖 12 $F5$ ($f/D = 0.5$ 、 $h/D = 0.0$) 係數 C 實驗值與擬合值觀察

接著從係數 K 觀察，因為係數 K 代表著頻率為零時的起始係數。圖 13 中黑色線為擬合值，紅色線為實驗值。擬合值與實際的實驗值相差許多，當間隔二時更為明顯，在跨區部分，分離區和尾跡區部分實驗值係數明顯都有較小值出現。

圖 13 F0 模型($f/D = 0.5$ 、 $h/D = 0.0$)係數 K 實驗值與擬合值比較

4. 結論

本研究依據不同 f/D 與 h/D 的變化，分成四種半圓頂型屋蓋類型並提出分區概念。當 $f/D = 0.0$ 配合全部的 h/D ，歸類為平坦模型。分成兩區，尾跡區與過尾跡區。 $f/D = 0.1$ 配合 $h/D = 0.0 \sim 0.1$ ，歸類為近半球模型。只分一區分離區。 $f/D = 0.1$ 配合 $h/D = 0.2 \sim 0.5$ ，歸類為平坦半球模型，分成兩區尾跡區與過尾跡區； $f/D = 0.2 \sim 0.5$ 配合全部的 h/D ，歸類為半球模型，分成三區迎風區、分離區與尾跡區。依據分區的概念與 f/D 不同的變化，可以明顯地觀察到交相關頻譜辦經驗模式中擬合係數的變化。當擬合之兩壓力孔的間隔增大更能顯著變化的發生。擬合係數 C 與 K 的分佈變化與 h/D 的改變幾乎沒有影響。從係數擬合結果觀察，對於Root-coherences的經驗公式的擬合還不夠完整，係數 K 的擬合不是很準確，需要進一步的改進。

參考文獻

- [1] Lo, Y. L., Kanda, J., Cross Spectra of Wind Pressures on Domed Roofs in Boundary Layer Wind Tunnel, 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications 2012
- [2] Cheng, C. M., Fu, C. L., Characteristics of Wind Loads on a Hemispherical Dome in Smooth Flow and Turbulent Boundary Layer Flow, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 98, 328-344
- [3] Lo, Y. L., Hsiao, T. T., Coherence Characteristics of Pressure Fluctuations on Hemispherical Dome, International Wind Engineering Symposium and Advanced School on Wind Engineering 2014
- [4] Hui, M. C. H., Larsen, A., Xiang, H. F., Wind turbulence characteristics study at the Stonecutters Bridge site: Part II Wind power spectra, integral length scales and coherences, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 97, 48-59